

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.10.027

咸淡水交替灌溉对土壤盐分分布及夏玉米生长的影响

朱成立^{1,2} 舒慕晨² 张展羽^{1,2} 翟亚明^{1,2} 闵勇² 黄明逸²

(1. 河海大学南方地区高效灌排与农业水土环境教育部重点实验室, 南京 210098;

2. 河海大学水利水电学院, 南京 210098)

摘要: 为了研究不同咸淡水交替灌溉制度对各层土壤盐分含量、夏玉米生长的影响, 采用3种矿化度(1、3、5 g/L)微咸水和3种不同生育期(壮苗期、拔节期、灌浆期)咸淡水交替灌溉方式(“咸淡淡”、“淡咸淡”、“淡淡咸”)开展避雨盆栽试验研究。结果表明, 全生育期灌溉淡水处理(CK)各层土壤盐分含量最低, 随着灌溉微咸水矿化度增加, 各层土壤盐分含量增大, 相同矿化度下, 同一深度土壤盐分含量由大到小依次为“淡淡咸”、“淡咸淡”、“咸淡淡”。3 g/L和5 g/L“淡淡咸”处理的土壤含盐量由大到小依次为下层、上层、中层, 其他处理由大到小依次为下层、中层、上层。不同生育期灌溉微咸水对夏玉米的株高、叶面积及产量的抑制程度由大到小依次为拔节期、壮苗期、灌浆期, 即“淡咸淡”、“咸淡淡”、“淡淡咸”, 抑制作用随灌溉微咸水矿化度增加而增大, 5 g/L“淡咸淡”处理与CK相比减产最多, 减产率为34.85%。在滨海地区进行夏玉米种植, 应考虑在生育后期灌溉微咸水, 同时利用非生育期淡水灌溉降低土壤次生盐碱化的风险。

关键词: 夏玉米; 产量; 交替灌溉; 微咸水; 土壤盐分

中图分类号: S273.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2017)10-0220-09

Effect of Alternate Irrigation with Fresh and Brackish Water on Saline Distribution Characteristics of Soil and Growth of Summer Maize

ZHU Chengli^{1,2} SHU Muchen² ZHANG Zhanyu^{1,2} ZHAI Yaming^{1,2} MIN Yong² HUANG Mingyi²

(1. Key Laboratory of Efficient Irrigation - Drainage and Agricultural Soil - Water Environment in Southern China, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China

2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to make full use of saline water resources, a pot experiment was carried out to investigate the characteristics of soil salt distribution and the growth of summer maize (*Zea mays* L.) subjected to three alternate brackish water irrigation methods (i. e., BFF: in which maize was irrigated with brackish water at the seedling stage and fresh water at the remaining periods; FBF: in which brackish water was irrigated at the jointing stage and fresh water at other stages; FFB: in which plants were watered with brackish water at the filling stage and fresh water at the vegetative stage) at three levels (i. e., L was 1 g/L NaCl; M was 3 g/L NaCl; H was 5 g/L NaCl), respectively. The results showed that the soil salt content under fresh water irrigation throughout the whole growth period (CK) was the lowest, and the higher the salinity of brackish water was applied, the higher the soil salt content was. Under the same salinity of brackish water irrigation, the descending order of average soil salt content distribution in the same depth was FFB, FBF and BFF. After harvest, in the 0 ~ 15 cm soil layer, the average soil salt contents of BFFL, FBFL, FFBL, BFFM and FBFM were lower compared with the original soil salt content. The similar reductions were found in the 15 ~ 30 cm soil layer, while the average soil salt content in the 30 ~ 45 cm soil layer were 36.92%, 39.20%, 51.54%, 96.91% and 88.17% higher than the original soil salt contents of these treatments. The average soil salt content of BFFH was higher than the original soil salt contents by 8.92% and 135.44% in the 15 ~ 30 cm and 30 ~ 45 cm soil layers, respectively, and with lower average soil salt content in the 0 ~ 15 cm soil layer.

收稿日期: 2017-06-05 修回日期: 2017-07-31

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(51409086)和国家重点研发计划项目(2016YFC0400200)

作者简介: 朱成立(1967—),男,副教授,博士,主要从事节水灌溉理论与技术、农田灌溉与排水研究, E-mail: clz@hhu.edu.cn

通信作者: 翟亚明(1982—),男,副教授,博士,主要从事节水灌溉理论与技术等研究, E-mail: zhaimhhu@163.com

Moreover, the higher average soil salt contents than the original soil salt contents were found in all soil layers of FBFH, FFBM and FFBH. The average soil salt contents of FFB at 3 g/L and 5 g/L levels were highest in the 30 ~ 45 cm soil layer, followed by those of the 0 ~ 15 cm soil layer, while the average soil salt contents were the minimum in the 15 ~ 30 cm soil layer. Instead, the average soil salt contents of other treatments followed the order from high to low was the 30 ~ 45 cm soil layer, 15 ~ 30 cm soil layer and 0 ~ 15 cm soil layer. The inhibition degree of different brackish irrigation to the growth related traits such as plant height, leaf area of summer maize in decreasing order were as follows: the jointing stage, the seedling stage and the filling stage. As the degree of salinity was increased, the inhibitory effect became more significant. In all brackish water irrigation methods, the order of plant dry weight, grain weight and the 100-grain weight from high to low was FBF, BFF and FFB. Furthermore, with the increase of water salinity, the yield of summer maize was decreased gradually. With the same irrigation amount, the yield of FBFH was the lowest, which decreased grain weight by 34.85% compared with CK. For maize cultivation in coastal area, the brackish water should be irrigated in the late growth stage to ensure the output. After that, fresh water irrigation would be beneficial during the noncrops growing season for salt leaching and reducing the risk of the soil secondary salinization.

Key words: summer maize; yield; alternate irrigation; brackish water; soil salinity

引言

我国滨海地区淡水资源时空分布不均,旱季降雨不足,易导致季节性干旱,造成作物减产,丰富的微咸水成为该地区农业生产的主要水源。研究表明:微咸水灌溉一般指利用矿化度不超过 5 g/L 的含盐水进行灌溉,一方面可增加土壤水分,有利于作物的生长发育^[1],另一方面过多的盐分累积会对作物生长发育产生不良影响^[2]。因此,合理开发利用微咸水资源,以咸补淡进行农业补充灌溉成为滨海地区农业可持续发展的重要研究课题。

目前国内外在微咸水灌溉适应性等方面的研究逐渐成熟^[3-5],实践证明,相同盐分水平下,咸淡水交替灌溉与咸淡水混灌相比增产效果更明显^[6]。玉米是滨海地区的主要粮食作物之一,种植面积广、生育期长、耗水量大,已有研究表明其对于土壤盐分胁迫属于中度敏感^[7],因此研究咸淡水交替灌溉对土壤盐分分布和玉米生长及产量的影响具有重要意义。近年来,国内外学者在咸淡轮灌的土壤盐分分布^[8-10]、灌溉制度^[11-12]对作物的影响等方面进行了研究。苏莹等^[13]利用不同咸淡水轮灌模拟试验,得出咸淡咸轮灌方式的土壤入渗能力较大,且土壤盐分脱盐率较高,而同一土层的淡咸咸轮灌方式土壤含水率高。苏瑞东^[14]研究表明,不同咸淡水轮灌方式都会使土壤盐分发生表聚现象,淡咸咸处理土壤盐分不会引起土壤次生盐渍化,对作物产量影响最小。咸淡水交替灌溉的重点在于选择作物耐盐生长阶段进行微咸水灌溉,而在作物非耐盐阶段灌溉淡水。米迎宾等^[15]研究表明,连续使用 3 g/L 微咸水对小麦和玉米进行灌溉会引起土壤盐分的累积及

作物减产,组合灌溉最好采用“淡淡咸”的咸淡轮灌方式。尉宝龙等^[16]研究发现作物苗期利用淡水灌溉,中后期利用咸水灌溉,其冬小麦、春玉米与棉花的产量较苗期使用咸水、中后期淡水灌溉的产量分别提高 6.6%、4.2%、5.2%,比单用咸水灌溉增产 39.1%、7.9%、26.3%。

利用微咸水进行灌溉需控制作物根层的土壤溶液浓度,避免土壤盐分累积超过作物耐受范围,研究不同生育期夏玉米对微咸水的敏感程度是优化咸淡交替灌溉制度的关键。上述研究多偏重于讨论不同咸淡轮灌制度对土壤盐分的影响,以及单一矿化度微咸水的不同轮灌方式对作物的影响,而综合考虑不同矿化度的微咸水与淡水交替灌溉的研究鲜见。因此,本文针对滨海地区水资源现状,利用盆栽试验研究在一咸两淡交替灌溉制度下,不同矿化度微咸水和淡水交替灌溉方式对土壤盐分分布和夏玉米生长的影响,进一步探究夏玉米不同生长时期对盐胁迫的抗性,探索一种适合滨海地区、使土壤盐分多年不累积且对夏玉米生长及产量影响最小的咸淡交替灌溉制度,以期有效节约淡水资源、合理利用微咸水进行灌溉提供一定科学依据。

1 材料与方 法

1.1 试验区概况

试验于 2016 年 7 月—11 月在河海大学节水园区节水与农业生态试验场内进行,试验区地处北纬 31°86′、东经 118°60′,属亚热带湿润气候,冬冷夏热、四季分明。

1.2 供试土壤基本性质

供试土壤取自江苏省东台滨海地区耕作层土壤,其基本物理性质如表 1 所示。

表1 供试土壤基本物理性质

Tab.1 Basic physical properties of experimental soil

土壤质地	土壤粒径分布(质量分数)/%			土壤容重 γ_s / ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	田间持水率 θ / ($\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$)	土壤含盐量 / ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)
	砂粒	粉粒	黏粒			
	(粒径 0.02 ~ 2 mm)	(粒径 0.002 ~ 0.02 mm)	(粒径 0 ~ 0.002 mm)			
粘壤土	45.39	37.75	16.86	1.34	31.57	0.88

1.3 试验设计

采用直径 32 cm, 高 50 cm 圆桶进行夏玉米避雨盆栽试验, 供试品种为隆平 206。供试土壤自然风干后过 5 mm 筛, 分层压实装填至同一深度(45 cm), 每桶装土 48 kg, 玉米桶壁铺设遮阳网。播种前将玉米生长所需肥料均匀混合于表层土壤中。玉米于 2016 年 7 月 29 日播种, 5 d 后出苗, 待至壮苗期开始不同灌溉处理。

以玉米不同生育期灌溉微咸水和不同灌水矿化度为双因素进行完全试验, 设置 1 个全生育期灌溉淡水(0.08 g/L NaCl)对照处理(CK)。按照当地灌溉经验, 除造墒水外, 将玉米全生育期分为壮苗期

(8 月 12 日—8 月 27 日)、拔节期(8 月 28 日—9 月 13 日)、灌浆期(9 月 14 日—10 月 6 日)进行灌水, 共设置 3 种咸淡交替灌溉方式: ①BFF 表示“咸淡淡”, 指壮苗期灌溉微咸水, 其他生育期灌溉淡水。②FBF 表示“淡咸淡”, 指拔节期灌溉微咸水, 其他生育期灌溉淡水。③FFB 表示“淡淡咸”, 指灌浆期灌溉微咸水, 其他生育期灌溉淡水。微咸水矿化度设 3 种水平: L 指低水平(1 g/L); M 指中等水平(3 g/L); H 指高水平(5 g/L)。共 10 个处理, 每个处理 3 次重复, 随机排放, 各个处理具体方案如表 2 所示。玉米成熟期不灌水, 其他管理措施同一般大田, 播种后 95 d 收割。

表2 咸淡水交替灌溉试验方案

Tab.2 Experimental design for alternate irrigation with fresh and brackish water

生育期	CK	BFFL	BFFM	BFFH	FBFL	FBFM	FBFH	FFBL	FFBM	FFBH	g/L
壮苗期(15 ~ 30 d)	F	1	3	5	F	F	F	F	F	F	
拔节期(31 ~ 47 d)	F	F	F	F	1	3	5	F	F	F	
灌浆期(48 ~ 70 d)	F	F	F	F	F	F	F	1	3	5	

注: 天数自播种始计, F 代表淡水灌溉, 数量代表不同矿化度微咸水灌溉。

不同矿化度微咸水均由 NaCl (AR) 配置而成。壮苗期土壤含水率控制在田间持水率的 60% ~ 80%, 拔节期和灌浆期土壤含水率控制在田间持水率的 60% ~ 95%。灌溉水量通过对照组称量得到, 所有处理灌溉水量与 CK 保持一致, 总灌溉水量为 35 L, 壮苗期、拔节期灌溉水量均为 10 L, 灌浆期为 15 L, 各个处理灌溉微咸水量约占总灌水量的 1/3,

具体灌水定额如表 3 所示。灌溉水于傍晚通过喷壶均匀洒入, 过程中无积水。

1.4 指标测定方法

(1) 土壤含盐量

在玉米播种前、收获后及每次灌水前后 2 d 采用土钻分层(0 ~ 15 cm、15 ~ 30 cm、30 ~ 45 cm)取土进行测量, 每次取样后回填钻孔并做标记, 土样经风

表3 各处理灌水定额

Tab.3 Irrigation amount for different irrigation treatments

处理	8月14日	8月20日	8月26日	8月30日	9月03日	9月07日	9月14日	9月20日	9月26日	10月02日	L
CK	4	3	3	4	3	3	4	4	4	3	
BFFL	4 [#]	3 [#]	3 [#]	4	3	3	4	4	4	3	
BFFM	4 [#]	3 [#]	3 [#]	4	3	3	4	4	4	3	
BFFH	4 [#]	3 [#]	3 [#]	4	3	3	4	4	4	3	
FBFL	4	3	3	4 [#]	3 [#]	3 [#]	4	4	4	3	
FBFM	4	3	3	4 [#]	3 [#]	3 [#]	4	4	4	3	
FBFH	4	3	3	4 [#]	3 [#]	3 [#]	4	4	4	3	
FFBL	4	3	3	4	3	3	4 [#]	4 [#]	4 [#]	3 [#]	
FFBM	4	3	3	4	3	3	4 [#]	4 [#]	4 [#]	3 [#]	
FFBH	4	3	3	4	3	3	4 [#]	4 [#]	4 [#]	3 [#]	

注: #表示灌溉微咸水, 其他为灌溉淡水。

干、充分研磨后过 1 mm 筛,采用土水比 1:5 的方法配制和提取土壤饱和浸滴液,用 DS-307A 型电导率仪测定土壤含盐量。

(2) 作物耗水量

作物耗水量^[17]计算公式为

$$ET = P_r + U + I - R - D - \Delta W \quad (1)$$

式中 ET ——作物耗水量,mm

P_r ——生育期间自然降水量,mm

U ——地下水补给量,mm

I ——灌水量,mm R ——径流量,mm

D ——深层渗漏量,mm

ΔW ——试验初期到末期土壤储水量的变化量,mm

玉米播种前和收获后,通过称量法测定土壤含水率,由于玉米种在避雨盆栽中,无排水措施,因此, P_r 、 U 、 R 、 D 均忽略不计,式(1)可简化为

$$ET = I - \Delta W \quad (2)$$

(3) 生长指标

玉米出苗后第 7 天开始测定玉米植株株高、叶面积等生长指标,每隔 7 d 测量一次至全生育期结束。株高采用卷尺测量植株自然状态下最高点至根茎部的垂直高度。叶面积采用 LI-3000A 型叶面积仪测定第 2 片展开叶。

(4) 产量

收获时,对玉米进行考种,测量玉米的穗长、秃尖长、穗粗、穗质量、百粒质量、地上干物质质量等指标。穗长、秃尖长、穗粗用游标卡尺测定,测 3 次,取均值;将地上部分在 105℃ 下杀青 2 h,然后在 75℃ 下干燥至质量恒定可得到地上干物质质量;对收获的果实进行称量,计算每颗玉米穗的穗粒数,并从玉米穗粒中随机取 3 个重复,每个重复 100 粒,各自称量并取平均数计算百粒质量。

1.5 数据分析

试验数据采用 Excel 进行记录和整理,采用 SPSS 20 统计软件对灌溉水矿化度和不同咸淡水交替灌溉方式 2 个主效应进行方差分析,采用 Origin 9.0 软件制图。

2 结果与分析

2.1 土壤剖面盐分的动态变化

在整个玉米生育期内,土壤盐分随着灌水和蒸发呈现一定的变化规律,本文对作物根层土壤分 3 层(0~15 cm 为上层、15~30 cm 为中层、30~45 cm 为下层)进行分析研究。图 1 反映夏玉米全生育期(第 15 天至第 30 天为壮苗期,第 31 天至第 47 天为拔节期,第 48 天至第 70 天为灌浆期)内不同灌水处

理各土层土壤含盐量的动态变化过程。从图 1 中可看出,灌溉淡水后,与灌前相比,上层和中层土壤含盐量明显减小,下层土壤含盐量变化较小,在灌后能维持稳定或略有升高;灌溉微咸水后,各层土壤含盐量明显增加,且灌溉微咸水矿化度越大,土壤盐分增加越多。灌水 2 d 后,所有处理上层和中层土壤含盐量逐渐减小,下层土壤含盐量增加,表明土壤盐分随灌水向下层土壤运移。2 次灌水间隔期,随着土壤水分蒸发,下层土壤盐分向上运移,导致中层和上层土壤含盐量增加。

壮苗期灌溉结束后,8 月 27 日,BFFL、BFFM、BFFH 处理 0~15 cm 土层土壤含盐量相比灌溉微咸水前分别增加 0.18、0.45、0.73 g/kg(图 1a),15~30 cm 土层土壤含盐量分别增加 0.11、0.43、0.70 g/kg(图 1d),30~45 cm 土层土壤含盐量分别增加 0.47、0.75、0.79 g/kg(图 1g);拔节期灌溉结束后,9 月 8 日,FBFL、FBFM、FBFH 处理的 0~15 cm 土层土壤含盐量相比灌溉微咸水前分别增加 0.14、0.50、0.73 g/kg(图 1b),15~30 cm 土层土壤含盐量分别增加 0.22、0.52、0.79 g/kg(图 1e),30~45 cm 土层土壤含盐量分别增加 0.35、0.67、1.07 g/kg(图 1h);灌浆期灌溉结束后,10 月 3 日,FFBL、FFBM、FFBH 处理的 0~15 cm 土层土壤含盐量相比灌溉微咸水前分别增加 0.33、1.01、1.29 g/kg(图 1c),15~30 cm 土层土壤含盐量分别增加 0.30、0.41、0.92 g/kg(图 1f),30~45 cm 土层土壤含盐量分别增加 0.24、0.72、1.18 g/kg(图 1i)。

在全生育期内,各处理的土壤含盐量有明显变化。CK 处理的上层和中层土壤含盐量全生育期内随灌水次数增加呈现减小趋势,下层土壤含盐量增加,但在灌浆期由于灌水时间间隔较长,间隔末期土壤盐分随着水分蒸发明显上移,下层土壤含盐量减小,上层和中层土壤含盐量增加。BFFL、BFFM、BFFH 处理的土壤含盐量全生育期表现出与 CK 类似的变化趋势,在壮苗期灌溉微咸水后各土层盐分增加,拔节期和灌浆期的淡水灌溉减小了上层和中层土壤含盐量,盐分逐渐积累在下层土壤中。FBFL、FBFM、FBFH 处理的上层和中层土壤含盐量全生育期内呈现先增加后减小的变化趋势,壮苗期灌溉淡水导致盐分向下运移,拔节期灌溉微咸水后,各层土壤含盐量明显增加,灌浆期土壤含盐量变化与 BFFL、BFFM、BFFH 类似。FFBL、FFBM、FFBH 处理的土壤含盐量在壮苗期与拔节期变化趋势与 CK 类似,灌浆期灌溉微咸水后,各层土壤含盐量增加,由于灌浆期后缺少淡水灌溉的淋洗作用,相比在壮苗期和拔节期进行微咸水灌溉,其土壤盐分积累最

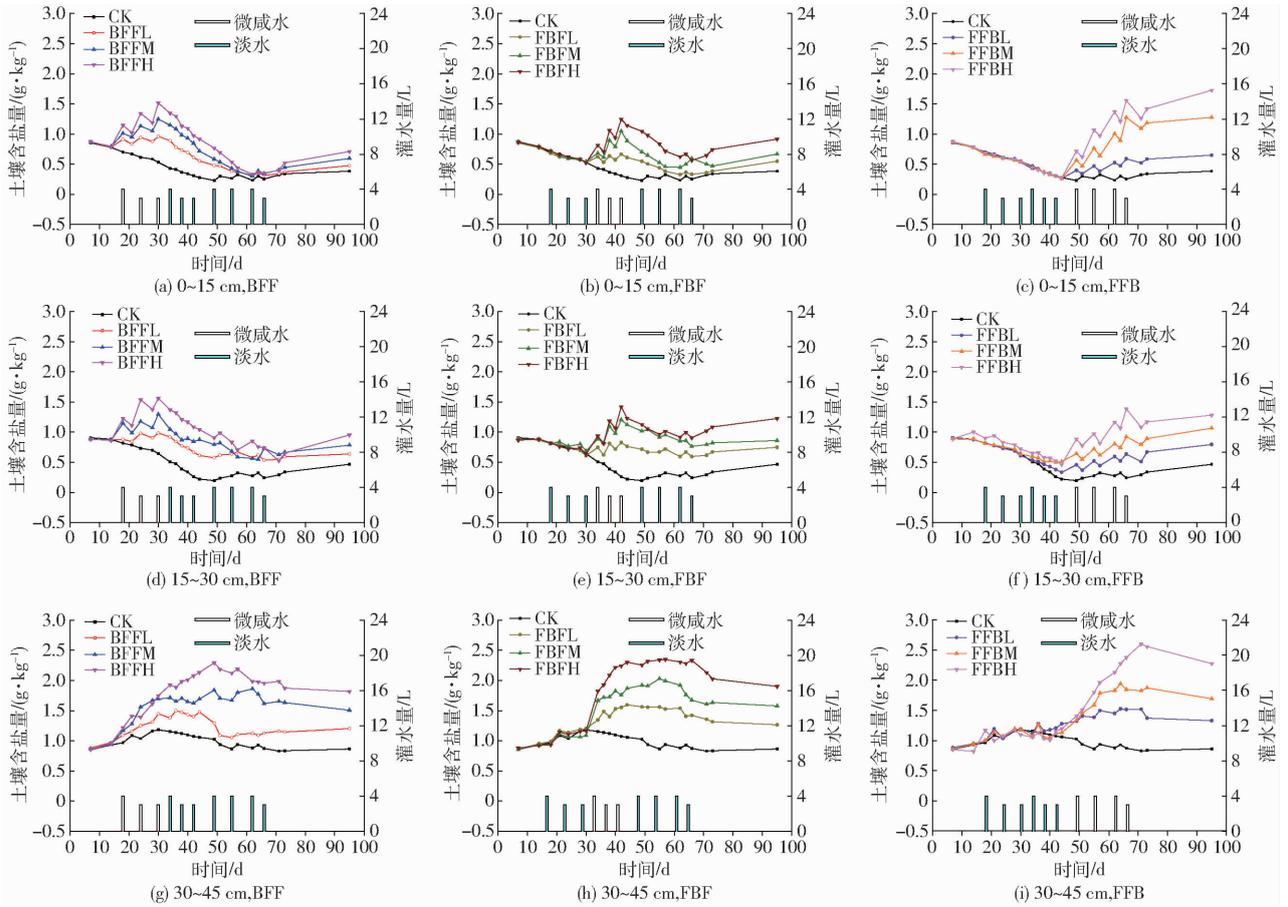


图1 不同灌水处理各土层土壤含盐量动态变化过程

Fig. 1 Dynamics processes of salt content in different soil layers with different irrigation treatments

大。由图1可看出,灌溉微咸水后,BFFL、BFFM、BFFH、FBFL、FBFM、FBFH、FFBL处理的各层土壤含盐量由大到小表现为下层、中层、上层,而FFBM、FFBH处理为下层、上层、中层。

2.2 微咸水交替灌溉对土壤剖面盐分分布的影响

微咸水灌溉后,土壤中盐分变化主要受灌溉水量、微咸水矿化度和土壤质地等因素的影响,不同的灌水处理导致盐分在不同土层中的分布情况不同。

图2为不同灌水处理下夏玉米收获后土壤剖面盐分分布情况,可以看出,CK处理的土壤剖面盐分含量最低,上、中、下层土壤含盐量分别比土壤初始

含盐量(CS)减小了56.00%、56.89%和1.80%。微咸水灌溉明显影响了各层土壤含盐量,盐分在不同土层中逐渐累积下来,同时灌水矿化度越大,各层土壤盐分积累越多。玉米收获后,BFFL、FBFL、FFBL、BFFM、FBFM处理的上层和中层土壤含盐量较初始含盐量均减小,而下层土壤含盐量相比于初始含盐量分别增加36.92%、39.20%、51.54%、96.91%和88.17%;BFFH处理的上层土壤含盐量比土壤初始含盐量小,中层和下层较初始含盐量增加了8.92%和135.44%;FBFH、FFBM、FFBH处理的上、中、下层土壤含盐量相比于土壤初始含盐量均增加。

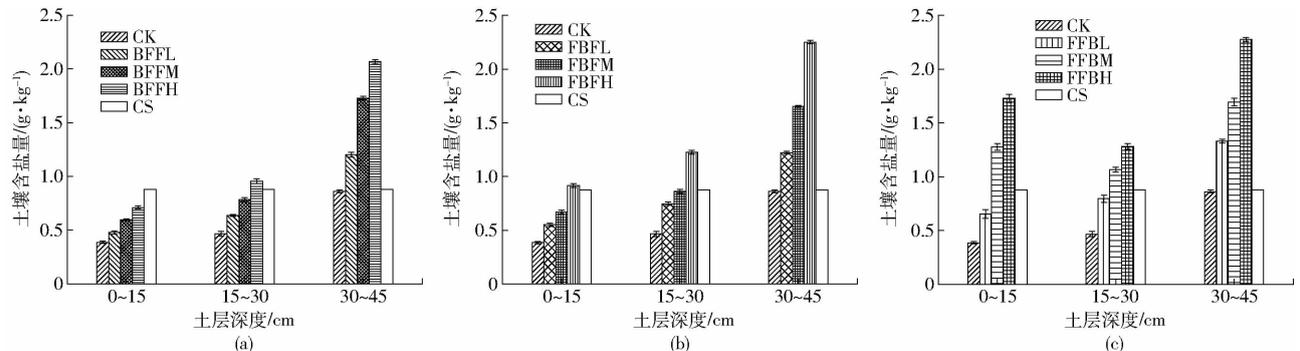


图2 不同灌水处理土壤盐分剖面分布

Fig. 2 Soil salt content distributions for different irrigation treatments of cross-sectional profile

相同矿化度的微咸水灌溉处理下,同一深度土层土壤含盐量由大到小表现为“淡淡咸”、“淡咸淡”、“咸淡淡”。对于不同咸淡水交替灌溉处理,土壤含盐量表现出随深度增加而增大的趋势,上层土壤的盐分随着灌水次数的增加逐渐下移,盐分主要积累在下层土壤中,但 FFBM、FFBH 的各层土壤含盐量由大到小依次为下层、上层、中层,且上层分别比中层增加了 0.24 g/kg 和 0.51 g/kg,与其它处理有差异。

2.3 咸淡水交替灌溉对玉米株高和叶面积的影响

株高是表征植株垂向高度的生育指标值,它是反映作物生长状态的有效指标^[18]。对玉米的株高测量贯穿玉米全生育期。

由表 4 可看出,任一生育期灌溉微咸水,随着微咸水矿化度增加,整个生育期玉米株高的增长率都呈现逐渐减小的趋势,不同矿化度和不同咸淡水交替灌溉方式对其具有显著的影响($P < 0.05$)。壮苗期灌溉微咸水后,8月28日,相比 CK 处理,BFFL、BFFM、BFFH 处理的株高分别减小 1.17、6.47、

18.90 cm;拔节期灌溉微咸水后,9月11日,FBFL、FBFM、FBFH 分别减小 3.00、14.13、25.67 cm;灌浆期灌溉微咸水后,10月2日,FFBL、FFBM、FFBH 分别减小 2.23、4.00、7.07 cm。10月16日,各处理的株高由大到小依次为 CK、BFFL、FFBL、FFBM、FBFL、FFBH、BFFM、FBFM、BFFH、FBFH,且 BFFL、FFBL、FFBM、FBFL 与 CK 的值很接近,说明任一生育期灌溉 1 g/L 微咸水处理的株高与 CK 处理相比无明显区别;壮苗期灌溉矿化度大于 3 g/L 的微咸水对株高影响较大;拔节期灌溉矿化度为 3、5 g/L 的微咸水对株高都会产生一定抑制作用,且随着微咸水矿化度增加,对株高的抑制作用越明显;而在灌浆期灌溉不同矿化度的微咸水对株高均无明显影响,这主要是因为灌浆期玉米主要进行生殖生长,株高变化不大。综上,微咸水矿化度越大,玉米株高越小,不同生育期玉米株高对盐分的敏感程度由大到小依次为拔节期、壮苗期、灌浆期,不同交替灌溉方式对玉米株高的影响程度由大到小依次为“淡淡咸”、“咸淡淡”、“淡淡咸”。

表 4 不同处理夏玉米株高随时间动态变化过程

Tab. 4 Dynamic process of summer maize plant height over time for different treatments

处理	处理前	壮苗期	拔节期		灌浆期	成熟期
	(8月7日)	(8月14日)	8月28日	9月11日	(10月2日)	(10月16日)
CK	34.13 ± 0.35 ^{Aa}	60.17 ± 0.35 ^{Aa}	131.07 ± 0.90 ^{Aa}	180.23 ± 0.25 ^{Aa}	209.07 ± 0.90 ^{Aa}	212.07 ± 0.90 ^{Aa}
BFFL	34.50 ± 0.30 ^{Aa}	60.60 ± 0.40 ^{Aa}	129.90 ± 2.19 ^{Cb}	177.80 ± 0.95 ^{Bb}	207.17 ± 1.04 ^{Cb}	210.83 ± 1.44 ^{Cb}
BFFM	34.40 ± 0.26 ^{Aa}	59.20 ± 0.30 ^{Aa}	124.60 ± 0.46 ^{Cc}	173.17 ± 0.76 ^{Bc}	201.40 ± 0.53 ^{Cc}	204.03 ± 0.45 ^{Cc}
BFFH	33.90 ± 0.26 ^{Aa}	58.83 ± 0.15 ^{Aa}	112.17 ± 0.65 ^{Cd}	159.07 ± 0.60 ^{Bd}	186.90 ± 0.36 ^{Cd}	192.10 ± 0.66 ^{Cd}
FBFL	33.80 ± 0.30 ^{Aa}	60.93 ± 0.25 ^{Aa}	127.43 ± 0.50 ^{Bb}	177.23 ± 0.25 ^{Cb}	205.07 ± 0.90 ^{Db}	208.07 ± 0.90 ^{Db}
FBFM	33.80 ± 0.26 ^{Aa}	60.33 ± 0.80 ^{Aa}	130.37 ± 0.55 ^{Bc}	166.10 ± 0.85 ^{Cc}	189.80 ± 0.53 ^{Dc}	193.00 ± 0.50 ^{Dc}
FBFH	33.83 ± 0.91 ^{Aa}	59.30 ± 0.75 ^{Aa}	130.60 ± 0.40 ^{Bd}	154.57 ± 0.40 ^{Cd}	175.07 ± 0.90 ^{Dd}	179.17 ± 0.29 ^{Dd}
FFBL	33.90 ± 0.79 ^{Aa}	59.73 ± 0.95 ^{Aa}	130.57 ± 0.40 ^{Bb}	180.53 ± 0.50 ^{Bb}	206.83 ± 0.76 ^{Bb}	210.03 ± 0.45 ^{Bb}
FFBM	33.73 ± 0.68 ^{Aa}	59.93 ± 1.12 ^{Aa}	129.03 ± 0.45 ^{Bc}	179.83 ± 0.29 ^{Bc}	205.07 ± 0.90 ^{Bc}	208.83 ± 0.76 ^{Bc}
FFBH	34.03 ± 0.80 ^{Aa}	60.57 ± 1.07 ^{Aa}	128.40 ± 0.53 ^{Bd}	178.43 ± 0.51 ^{Bd}	202.00 ± 1.00 ^{Bd}	207.20 ± 0.53 ^{Bd}

注:表中数据为平均值 ± 标准差,同一列数值后不同大写字母表明不同咸淡水交替灌溉方式处理下差异显著($P < 0.05$);不同小写字母表明不同矿化度处理下差异显著($P < 0.05$),下同。

表 5 为不同灌水处理植株叶面积随时间动态变化过程,可看出,叶面积受微咸水矿化度和不同交替灌溉方式的影响与株高相似。8月28日,BFFL、BFFM、BFFH 相比 CK 分别减小 3.62、15.02、32.38 cm²;9月11日,FBFL、FBFM、FBFH 分别减小 10.84、34.43、59.89 cm²;只在灌浆期灌溉微咸水时,FFBL、FFBM、FFBH 分别比 CK 减小 3.54、12.48、19.72 cm²。与 CK 处理相比,灌溉微咸水矿化度对于玉米叶面积的影响在整个生育期内都比较显著($P < 0.05$),不同生育期灌溉微咸水对叶面积的抑制程度由大到小依次为拔节期、壮苗期、灌浆期。

2.4 微咸水交替灌溉对产量及作物耗水量的影响

表 6 列出了不同灌水处理夏玉米的产量及耗水量。玉米整个植株的干物质质量是玉米产量形成的物质基础,穗粒数、百粒质量和穗质量是衡量作物产量的重要指标。通过对产量及其构成要素进行方差分析可知,微咸水矿化度和不同咸淡水交替灌溉方式对地上干物质质量、穗粒数、百粒质量和穗质量的影响显著($P < 0.05$)。灌溉微咸水的各处理产量均比 CK 处理产量低,整体表现为灌水矿化度越大,玉米产量越小。不同生育期灌溉相同矿化度微咸水处理的玉米产量由大到小表现为灌浆期、壮苗期、拔节期。相同灌水量条件下,BFFL、FBFL、FFBL 处理分

表5 不同处理夏玉米叶面积随时间动态变化过程

Tab.5 Dynamic process of summer maize leaf area over time for different treatments

cm²

处理	处理前	壮苗期	拔节期		灌浆期	成熟期
	(8月7日)	(8月14日)	8月28日	9月11日	(10月2日)	(10月16日)
CK	120.41 ± 2.16 ^{Aa}	234.24 ± 2.50 ^{Aa}	367.46 ± 1.04 ^{Aa}	480.68 ± 2.54 ^{Aa}	581.08 ± 1.55 ^{Aa}	596.00 ± 3.00 ^{Aa}
BFFL	119.81 ± 1.99 ^{Aa}	234.21 ± 1.51 ^{Aa}	363.84 ± 1.47 ^{Bb}	479.14 ± 1.21 ^{Bb}	578.56 ± 1.32 ^{Cb}	592.64 ± 1.09 ^{Cb}
BFFM	122.31 ± 0.97 ^{Aa}	234.26 ± 1.81 ^{Aa}	352.44 ± 1.94 ^{Bc}	464.62 ± 0.71 ^{Bc}	565.28 ± 2.25 ^{Cc}	577.60 ± 1.72 ^{Cc}
BFFH	120.75 ± 1.63 ^{Aa}	233.34 ± 2.03 ^{Aa}	335.08 ± 1.19 ^{Bd}	450.83 ± 0.96 ^{Bd}	551.46 ± 1.45 ^{Cd}	565.75 ± 2.44 ^{Cd}
FBFL	120.40 ± 0.77 ^{Aa}	233.32 ± 1.18 ^{Aa}	365.35 ± 1.19 ^{Ab}	469.84 ± 2.77 ^{Cb}	567.66 ± 1.88 ^{Db}	582.15 ± 2.34 ^{Db}
FBFM	121.21 ± 1.50 ^{Aa}	232.43 ± 2.10 ^{Aa}	364.95 ± 0.37 ^{Ac}	446.25 ± 2.60 ^{Cc}	540.88 ± 1.60 ^{De}	554.18 ± 1.69 ^{De}
FBFH	120.73 ± 1.31 ^{Aa}	231.77 ± 1.35 ^{Aa}	368.01 ± 0.86 ^{Ad}	420.79 ± 1.14 ^{Cd}	515.91 ± 2.06 ^{Dd}	526.69 ± 1.42 ^{Dd}
FFBL	120.87 ± 1.28 ^{Aa}	231.48 ± 1.16 ^{Aa}	366.43 ± 2.45 ^{Ab}	479.69 ± 1.37 ^{Ab}	577.54 ± 1.84 ^{Bb}	594.05 ± 1.59 ^{Bb}
FFBM	120.11 ± 0.82 ^{Aa}	231.99 ± 1.34 ^{Aa}	365.54 ± 1.05 ^{Ac}	480.40 ± 1.95 ^{Ac}	568.60 ± 2.15 ^{Bc}	583.13 ± 1.58 ^{Bc}
FFBH	121.54 ± 1.12 ^{Aa}	232.44 ± 2.10 ^{Aa}	367.00 ± 2.10 ^{Ad}	479.06 ± 2.24 ^{Ad}	561.36 ± 0.77 ^{Bd}	571.99 ± 0.42 ^{Bd}

表6 不同处理夏玉米产量及耗水量

Tab.6 Yield and water consumption of summer maize under different irrigation treatments

处理	地上干物质质量/(g·株 ⁻¹)	穗粒数	百粒质量/g	穗质量/g	耗水量 ET/mm
CK	317.40 ± 9.91 ^{Aa}	451.67 ± 15.63 ^{Aa}	33.90 ± 1.14 ^{Aa}	152.98 ± 1.25 ^{Aa}	406.28 ± 12.86 ^{Aa}
BFFL	297.07 ± 4.25 ^{Bb}	434.33 ± 15.50 ^{Ba}	32.85 ± 1.04 ^{Bab}	142.59 ± 3.13 ^{Bb}	393.27 ± 19.18 ^{Bab}
BFFM	282.23 ± 5.83 ^{Bc}	414.00 ± 14.00 ^{Bb}	31.74 ± 2.03 ^{Bbc}	131.21 ± 3.94 ^{Bc}	385.31 ± 15.88 ^{Bbc}
BFFH	259.51 ± 8.70 ^{Bd}	372.33 ± 8.50 ^{Bc}	30.63 ± 1.22 ^{Bc}	113.99 ± 2.47 ^{Bd}	373.57 ± 15.60 ^{Bc}
FBFL	291.35 ± 4.62 ^{Cb}	430.00 ± 9.54 ^{Ca}	32.28 ± 0.14 ^{Bab}	138.78 ± 2.50 ^{Cb}	388.31 ± 14.05 ^{Bab}
FBFM	252.33 ± 6.48 ^{Cc}	373.00 ± 20.66 ^{Cb}	30.46 ± 0.98 ^{Bbc}	113.53 ± 5.20 ^{Cc}	372.63 ± 18.02 ^{Bbc}
FBFH	231.47 ± 10.58 ^{Cd}	341.67 ± 16.44 ^{Cc}	29.18 ± 0.67 ^{Bc}	99.67 ± 12.03 ^{Cd}	358.90 ± 19.01 ^{Bc}
FFBL	305.28 ± 2.49 ^{Bb}	441.67 ± 17.01 ^{Ba}	33.04 ± 0.62 ^{Bab}	145.87 ± 2.92 ^{Bb}	396.08 ± 7.03 ^{Bab}
FFBM	289.78 ± 11.80 ^{Bc}	424.33 ± 20.50 ^{Bb}	32.13 ± 1.73 ^{Bbc}	136.13 ± 3.44 ^{Bc}	387.91 ± 9.81 ^{Bbc}
FFBH	262.16 ± 12.47 ^{Bd}	377.00 ± 3.00 ^{Bc}	30.97 ± 1.11 ^{Bc}	116.70 ± 5.03 ^{Bd}	375.97 ± 20.25 ^{Bc}

别比 CK 处理减产 4.65%、6.79% 和 9.28%，说明低浓度微咸水和淡水交替灌溉对产量影响较小。相比于 CK，拔节期灌溉高浓度微咸水 (FBFH) 玉米的减产率达到最大 (34.85%)。

从表 6 中可看出，全部淡水灌溉处理的玉米耗水量最大，不同咸淡水交替灌溉方式下玉米耗水量由大到小表现为“淡淡咸”、“咸淡淡”、“淡咸淡”，同时随着矿化度的增加，耗水量减小，FBFH 处理的玉米耗水量最小，相比于 CK 减少了 11.66%。

2.5 微咸水交替灌溉对穗部性状及收获指数的影响

微咸水灌溉导致夏玉米减产在玉米穗部性状上也有所体现，穗长、穗粗刻画玉米穗的大小，秃尖长

刻画穗粒的分布状况。如表 7 所示，灌溉微咸水使玉米果穗变短变细，秃尖变长，同 CK 的差异均达显著水平 ($P < 0.05$)。相同矿化度的不同咸淡水交替灌溉方式处理下，拔节期灌溉微咸水比壮苗期和灌浆期灌溉微咸水对玉米穗的外观形态影响大，其中，FBFH 处理的穗长、穗粗分别比 CK 减少了 28.77%、8.45%。收获指数是指穗籽粒质量和地上干物质质量之比^[19]。不同交替灌溉方式处理中灌溉 1 g/L 微咸水与 CK 处理的收获指数差异不显著 ($P > 0.05$)，其余处理的收获指数都显著 ($P < 0.05$) 偏低。其中 FBFM、FBFH 处理的收获指数分别较 CK 减小 6.25% 和 10.42%。

表7 不同处理夏玉米穗部性状和收获指数

Tab.7 Ear characters and harvest index of summer maize under different irrigation treatments

处理	穗长/cm	穗粗/cm	秃尖长/cm	收获指数
CK	24.57 ± 0.06 ^{Aa}	5.26 ± 0.10 ^{Aa}	1.76 ± 0.12 ^{Cc}	0.48 ± 0.01 ^{Aa}
BFFL	21.43 ± 0.15 ^{Cb}	5.22 ± 0.11 ^{Bb}	1.95 ± 0.13 ^{ABb}	0.48 ± 0.01 ^{Ba}
BFFM	20.27 ± 0.59 ^{Cc}	5.04 ± 0.05 ^{Bc}	1.98 ± 0.20 ^{ABab}	0.46 ± 0.01 ^{Bb}
BFFH	19.03 ± 1.85 ^{Cd}	4.91 ± 0.07 ^{Bd}	2.18 ± 0.16 ^{ABa}	0.44 ± 0.01 ^{Bc}
FBFL	22.77 ± 0.32 ^{Cb}	5.12 ± 0.08 ^{Cb}	1.98 ± 0.15 ^{Ab}	0.48 ± 0.01 ^{Ba}
FBFM	19.40 ± 0.95 ^{Cc}	4.92 ± 0.08 ^{Cc}	2.17 ± 0.23 ^{Aab}	0.45 ± 0.01 ^{Bb}
FBFH	17.50 ± 0.20 ^{Cd}	4.80 ± 0.04 ^{Cd}	2.31 ± 0.08 ^{Aa}	0.43 ± 0.01 ^{Bc}
FFBL	23.57 ± 0.12 ^{Bb}	5.13 ± 0.04 ^{Bb}	1.87 ± 0.07 ^{Bb}	0.48 ± 0.01 ^{Ba}
FFBM	23.07 ± 0.42 ^{Bc}	5.05 ± 0.05 ^{Bc}	1.94 ± 0.14 ^{Bab}	0.47 ± 0.02 ^{Bb}
FFBH	22.60 ± 0.62 ^{Bd}	5.00 ± 0.09 ^{Bd}	2.04 ± 0.11 ^{Ba}	0.45 ± 0.01 ^{Bc}

3 讨论

灌溉微咸水导致土壤含盐量增加,且微咸水矿化度越大,土壤中累积盐分越多^[20-24]。本试验结果显示,CK 处理各层土壤含盐量最小,咸淡水交替灌溉过程中,由于蒸发和灌水的交互作用,各层土壤含盐量变化明显。相同矿化度微咸水灌溉处理下,同一深度土层土壤含盐量由大到小表现为“淡淡咸”、“淡咸淡”、“咸淡淡”。“咸淡淡”处理后,夏玉米生育后期上层土壤盐分增量明显小于下层,其原因可能是灌溉微咸水带入的盐分离子与土壤胶体及土壤中原有离子发生交换,增强土壤胶体的絮凝作用,改变土壤团粒结构,使土壤导水能力增加^[25],有利于后 2 次淡水灌溉对上层土壤盐分的淋洗,大量盐分随着灌水往下层聚集,高含盐量土层不断扩展^[26],但盐分整体变化趋势与淡水灌溉类似^[27-29]。而“淡淡咸”处理土壤含盐量大,可能是由于前期灌溉淡水,土壤盐分向下运移,导致土壤上层脱盐、土壤深层积盐^[30],灌浆期灌溉微咸水后土壤含盐量大幅增加,由于玉米灌浆期耗水量大,随微咸水灌溉带入盐分更多,后期没有淡水淋洗,导致土壤累积盐分含量高。对于同一种灌溉方式的不同矿化度处理,随着微咸水矿化度增加,入渗能力逐渐增强,各层土壤盐分积累越多,这与史晓楠等^[31]利用入渗模型得到的矿化度增加能有效提高土壤的扩散率和饱和导水率的结论一致。在同一处理的垂直剖面上,土壤含盐量随深度增加而增大,但 FFBM、FFBH 的含盐量由大到小表现为下层、上层、中层,造成这一现象的原因可能是“淡淡咸”处理的土壤含盐量大,过量的盐分会引起土壤结皮,导致土壤渗透性减小^[32],上层水盐运移活跃,盐分表聚较多,下层土壤渗透能力变弱,盐分难以上移^[33]。

具体分析每一生育期灌溉后主根区土壤盐分含量可看出,某一生育期灌溉淡水后,土壤含盐量有所降低,而灌溉微咸水后土壤含盐量则有所升高^[11]。土壤积盐导致土壤水的有效势能下降,盐分对根系吸水产生胁迫作用,玉米难以充分利用土壤中的水分,耗水量减小。灌溉水矿化度越大,盐分的胁迫作用越严重,玉米耗水量越小^[34]。咸淡水交替灌溉对夏玉米株高、叶面积及产量的影响主要体现在微咸

水灌溉的生育期,与耗水规律一致,盐分胁迫降低了相应生育期中玉米蒸腾作用,从而影响玉米生长和产量形成^[35]。试验条件下,灌溉 1 g/L 微咸水的各处理玉米株高、叶面积和产量与 CK 没有明显的差异,其原因可能是灌溉低矿化度微咸水没有明显增加玉米主根区土壤的含盐量,所以对玉米生长的影响较小。BFFM、BFFH、FBFM、FBFH 处理对玉米生长的抑制作用较大,可能是因为玉米在生育前期主要进行营养生长,抗盐胁迫能力较弱,在壮苗期和拔节期灌溉一定浓度微咸水后,土壤盐分对其产生抑制作用,影响玉米前期的株高、叶面积等生长发育而导致减产,且矿化度越大,盐胁迫的抑制作用越大。对于“淡淡咸”灌溉方式,因壮苗期和拔节期玉米耐盐性较差,灌溉淡水既能满足生长所需水分,又不增加土壤盐分,有利于玉米生长发育,且玉米在灌浆期主要是生殖生长,抗盐胁迫能力增强,虽然 FFBM、FFBH 处理灌溉微咸水后土壤含盐量有一定幅度的增加,但盐分随着水分运移主要积累在上层和下层,中层土壤盐分含量较小,并未对玉米生长产生明显的胁迫影响。从上文的研究可知,微咸水矿化度越大,对玉米的株高、叶面积及产量的抑制作用越大,且玉米对于不同生育期微咸水灌溉的敏感程度由大到小依次为拔节期、壮苗期、灌浆期。

4 结束语

本试验在前人进行过 1 a 咸淡水交替灌溉试验基础上开展,综合 2 a 试验结果发现,合理利用微咸水灌溉需考虑夏玉米不同生育期的抗盐胁迫能力,尽量将微咸水安排在生育阶段的中后期^[36]。“淡咸淡”处理对玉米的生长和产量影响最大,应避免;“咸淡淡”处理土壤盐分含量低,能保证一定的产量,可用于指导实际生产;“淡淡咸”对夏玉米生长及产量的抑制作用最小,但土壤中累积的盐分最高。结合试验结果分析,长期利用微咸水和淡水进行交替灌溉,微咸水矿化度不宜过高,应优先选择“淡淡咸”轮灌模式。适宜的咸淡水交替灌溉模式下,玉米产量不减产或少量减产,土壤盐分通过降雨或灌溉淋洗实现年内平衡,有利于提高水分利用效率,达到既保证产量、不积盐还能合理利用水资源的目的。

参 考 文 献

- 1 杨从会,王立洪,胡顺军. 咸水膜下滴灌对棉花品质和产量的影响[J]. 人民黄河,2010,32(2): 85-86.
- 2 冯棣,张俊鹏,申孝军,等. 不同质地土壤咸水造墒对棉花出苗及幼苗生长的影响[J]. 灌溉排水学报,2013,32(6): 12-14. FENG Di, ZHANG Junpeng, SHEN Xiaojun, et al. Effects of saline water irrigating before sowing on cotton emergence and seedling growth in different soil textures[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2013, 32(6): 12-14. (in Chinese)
- 3 WIEDENFELD B. Effects of irrigation water salinity and electrostatic water treatment for sugarcane production[J]. Agricultural

- Water Management, 2008, 95(1): 85–88.
- 4 BEN-ASHER J, TSUYUKI I, BRAVDO B A, et al. Irrigation of grapevines with saline water; I. leaf area index, stomatal conductance, transpiration and photosynthesis[J]. *Agricultural Water Management*, 2006, 83(1–2): 13–21.
 - 5 李法虎, BENHUR M, KEREN R. 劣质水灌溉对土壤盐碱化及作物产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2003, 19(1): 63–66. LI Fahu, BENHUR M, KEREN R. Effect of marginal water irrigation on soil salinity, sodicity and crop yield[J]. *Transactions of the CSAE*, 2003, 19(1): 63–66. (in Chinese)
 - 6 MINHAS P S. Saline water management for irrigation in India[J]. *Agricultural Water Management*, 1996, 30(1): 1–24.
 - 7 ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirement-FAO irrigation and drainage paper 56[M]. Rome: FAO, 1998.
 - 8 MURTAZA G, GHAFOOR A, QADIR M. Irrigation and soil management strategies for using saline-sodic water in a cotton-wheat rotation[J]. *Agricultural Water Management*, 2006, 81(1–2): 98–114.
 - 9 管孝艳, 杨培岭, 吕焯. 咸淡水交替灌溉下土壤盐分再分布规律的室内实验研究[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(5): 88–91. GUAN Xiaoyan, YANG Peiling, LÜ Ye. Laboratory experiment on the redistribution of soil salinity under saline and fresh water alternate irrigation[J]. *Transactions of the CSAE*, 2007, 23(5): 88–91. (in Chinese)
 - 10 吕焯, 杨培岭, 管孝艳, 等. 咸淡水交替淋溶下土壤盐分运移试验[J]. *水利水电科技进展*, 2007, 27(6): 90–93. LÜ Ye, YANG Peiling, GUAN Xiaoyan, et al. Experimental study on salt movement in soil under saline and fresh water alternate leaching[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2007, 27(6): 90–93. (in Chinese)
 - 11 吴忠东, 王全九. 不同微咸水组合灌溉对土壤水盐分布和冬小麦产量影响的田间试验研究[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(11): 71–76. WU Zhongdong, WANG Quanjiu. Field study on impacts of soil water-salt distribution and winter wheat yield by different saline water combination irrigations[J]. *Transactions of the CSAE*, 2007, 23(11): 71–76. (in Chinese)
 - 12 叶海燕, 王全九, 刘小京. 冬小麦微咸水灌溉制度的研究[J]. *农业工程学报*, 2005, 21(9): 27–32. YE Haiyan, WANG Quanjiu, LIU Xiaojing. Slight saline water irrigation systems for winter wheat[J]. *Transactions of the CSAE*, 2005, 21(9): 27–32. (in Chinese)
 - 13 苏莹, 王全九, 叶海燕, 等. 咸淡轮灌土壤水盐运移特征研究[J]. *灌溉排水学报*, 2005, 24(1): 50–53. SU Ying, WANG Quanjiu, YE Haiyan, et al. Research of soil water and salt transport feature for alternative irrigation of fresh and saline water[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2005, 24(1): 50–53. (in Chinese)
 - 14 苏瑞东. 盐渍化灌区枸杞咸淡水轮灌模式试验研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2015. SU Ruidong. Experimental study on rotating irrigation mode with saline and fresh water for wolfberry in the salinization irrigation district [D]. Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2015. (in Chinese)
 - 15 米迎宾, 屈明, 杨劲松, 等. 咸淡水轮灌对土壤盐分和作物产量的影响研究[J]. *灌溉排水学报*, 2010, 29(6): 83–86. MI Yingbin, QU Ming, YANG Jingsong, et al. Effects of rotational irrigation with saline water on soil salinity and crop yield[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2010, 29(6): 83–86. (in Chinese)
 - 16 尉宝龙, 邢黎明, 牛豪震. 咸水灌溉技术试验研究[J]. *山西水利科技*, 1999(3): 88–90. WEI Baolong, XING Liming, NIU Haozhen. An experiment study on saline-water irrigation technology [J]. *Shanxi Hydrotechnics*, 1999(3): 88–90. (in Chinese)
 - 17 OWEIS T Y, FARAHANI H J, HACHUM A Y. Evapotranspiration and water use of full and deficit irrigated cotton in the Mediterranean environment in northern Syria[J]. *Agricultural Water Management*, 2011, 98(8): 1239–1248.
 - 18 胡文明. 微咸水灌溉对作物生长影响的试验研究[J]. *灌溉排水学报*, 2007, 26(1): 86–88. HU Wenming. Experimental study on effect of crop growth with light-saline water irrigation [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2007, 26(1): 86–88. (in Chinese)
 - 19 余卫东, 冯利平, 胡程达, 等. 苗期涝渍对黄淮地区夏玉米生长和产量的影响[J]. *生态学杂志*, 2015, 34(8): 2161–2166. YU Weidong, FENG Liping, HU Chengda, et al. Effects of waterlogging during seedling stage on the growth and yield of summer maize in Huang-Huai region[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, 34(8): 2161–2166. (in Chinese)
 - 20 HAN W, XU X W, LI L, et al. Chlorophyll a fluorescence responses of haloxylon ammodendron seedlings subjected to progressive saline stress in the tarim desert highway ecological shelterbelt[J]. *Photosynthetica*, 2010, 48(4): 635–640.
 - 21 AMER K H. Corn crop response under managing different irrigation and salinity levels[J]. *Agricultural Water Management*, 2010, 97(10): 1553–1563.
 - 22 PANG H C, LI Y Y, YANG J S, et al. Effect of brackish water irrigation and straw mulching on soil salinity and crop yields under monsoonal climatic conditions[J]. *Agricultural Water Management*, 2010, 97(12): 1971–1977.
 - 23 吴忠东, 王全九. 入渗水矿化度对土壤入渗特征和离子迁移特性的影响[J]. *农业机械学报*, 2010, 41(7): 64–69. WU Zhongdong, WANG Quanjiu. Effect on both soil infiltration characteristics and ion mobility features by mineralization degree of infiltration water[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, 41(7): 64–69. (in Chinese)
 - 24 季泉毅, 冯绍元, 霍再林, 等. 咸水灌溉对土壤盐分分布和物理性质及制种玉米生长的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2016, 35(3): 20–25. JI Quanyi, FENG Shaoyuan, HUO Zailin, et al. Effects of saline water irrigation on salinity distribution, soil physical properties and growth of seed maize[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2016, 35(3): 20–25. (in Chinese)

- PENG Hui, JIANG Jiali, ZHAN Tianyi, et al. Influence of density and moisture content on ultrasound velocities along the longitudinal direction in wood [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2016, 52(10): 117–124. (in Chinese)
- 20 OLIVEIRA F G R D, CANDIAN M, LUCCHETTE F F, et al. A technical note on the relationship between ultrasonic velocity and moisture content of Brazilian hardwood (*Goupia glabra*) [J]. *Building and Environment*, 2005, 40(2): 297–300.
- 21 SIMPSON W T, WANG X. Relationship between longitudinal stress wave transit time and moisture content of lumber during kiln-drying [J]. *Forest Products Journal*, 2001, 51(10): 51–54.
- 22 MISHIRO A. Ultrasonic velocity in wood and its moisture content I. effects of moisture gradients on ultrasonic velocity in wood [J]. *Journal of the Japan Wood Research Society*, 1995, 41(12): 1086–1092.
- 23 陈昌雄, 余坤勇, 曹祖宁. 小叶青冈天然林树干含水率的研究 [J]. *中南林业科技大学学报*, 2010, 30(12): 39–41, 46.
CHEN Changxiong, YU Kunyong, CAO Zuning. Moisture content of tree stem of *Cyclobalanopsis myrsinaefolia* (Bl.) oerst in natural forest [J]. *Journal of Central South University of Forestry and Technology*, 2010, 30(12): 39–41, 46. (in Chinese)
- 24 HASEGAWA M, TAKATA M, MATSUMURA J, et al. Effect of wood properties on within-tree variation in ultrasonic wave velocity in softwood [J]. *Ultrasonics*, 2011, 51(3): 296–302.
- 25 HASEGAWA M, YANO Y, MATSUMURA J, et al. Prospects for within-tree variation of the acoustoelastic behaviors in Japanese cedar [J]. *Ndt and E International*, 2012, 49(7): 57–63.
- 26 李国定, 涂坚, 石长生. 大噪声中微弱周期信号的自相关检测法 [C] // 中国计算机学会信息保密专业委员会年会, 1999.

~~~~~

(上接第 228 页)

- 25 郭太龙, 迟道才, 王全九, 等. 入渗水矿化度对土壤水盐运移影响的试验研究 [J]. *农业工程学报*, 2005, 21(5): 84–87.  
GUO Tailong, CHI Daocai, WANG Quanjiu, et al. Experimental study on salt and water movement affected by mineralization degree of infiltration water [J]. *Transactions of the CSAE*, 2005, 21(5): 84–87. (in Chinese)
- 26 CHEN L J, FENG Q, LI F R, et al. A bidirectional model for simulating soil water flow and salt transport under mulched drip irrigation with saline water [J]. *Agricultural Water Management*, 2014, 146(24–33): 24–33.
- 27 杨艳. 土壤溶质运移特征实验研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2006.  
YANG Yan. Experimental studies on soil solute transport [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2006. (in Chinese)
- 28 马东豪. 土壤水盐运移特征研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2005.  
MA Donghao. Studies on characteristics of soil water and salt movement [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2005. (in Chinese)
- 29 史晓楠, 王全九, 苏莹. 微咸水水质对土壤水盐运移特征的影响 [J]. *干旱区地理*, 2005, 28(4): 100–104.  
SHI Xiaonan, WANG Quanjiu, SU Ying. Effects of slight saltwater quality on the characteristics of soil water and salt transference [J]. *Arid Land Geography*, 2005, 28(4): 100–104. (in Chinese)
- 30 唐胜强, 余冬立. 灌溉水质对土壤饱和导水率和入渗特性的影响 [J/OL]. *农业机械学报*, 2016, 47(10): 108–114. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20161015&flag=1&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20161015&flag=1&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.10.015.  
TANG Shengqiang, SHE Dongli. Influence of water quality on soil saturated hydraulic conductivity and infiltration properties [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(10): 108–114. (in Chinese)
- 31 史晓楠, 王全九, 巨龙. 微咸水入渗条件下 Philip 模型与 Green-Ampt 模型参数的对比分析 [J]. *土壤学报*, 2007, 44(2): 360–363.  
SHI Xiaonan, WANG Quanjiu, JU Long. Parameters of Philip and Green-Ampt models for soils infiltrated with brackish water [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44(2): 360–363. (in Chinese)
- 32 FEIGIN A, RAVINA I, SHALHEVET J. Effect of irrigation with treated sewage effluent on soil, plant and environment [M]. Springer Berlin Heidelberg, 1991: 34–116.
- 33 陈丽娟, 冯起, 王昱, 等. 微咸水灌溉条件下含黏土夹层土壤的水盐运移规律 [J]. *农业工程学报*, 2012, 28(8): 44–51.  
CHEN Lijuan, FENG Qi, WANG Yu, et al. Water and salt movement under saline water irrigation in soil with clay interlayer [J]. *Transactions of the CSAE*, 2012, 28(8): 44–51. (in Chinese)
- 34 MASS E V, HOFFMAN G J. Crop salt tolerance: current assessment [J]. *Journal of the Irrigation & Drainage Division*, 1977, 103(2): 115–134.
- 35 邱让建, 刘春伟, 徐金勤, 等. 灌溉水含盐量对辣椒产量品质及水分利用效率的影响 [J]. *农业工程学报*, 2016, 32(10): 75–80.  
QIU Rangjian, LIU Chunwei, XU Jinqin, et al. Effect of irrigation water salinity on yield, quality and water use efficiency of hot pepper [J]. *Transactions of the CSAE*, 2016, 32(10): 75–80. (in Chinese)
- 36 王军涛, 程献国, 李强坤. 基于春玉米微咸水灌溉的水盐生产函数研究 [J]. *干旱地区农业研究*, 2012, 30(3): 78–80.  
WANG Juntao, CHENG Xianguo, LI Qiangkun. Study on the placement of sensors for moisture content in soil profile for cotton under mulched drip irrigation condition [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2012, 30(3): 78–80. (in Chinese)